6Ж

УДК 621.325:669.539.43

І.М. Журавель
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів
Україна, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 3

Аналіз текстури фрактографічних зображень на основі спектра фрактальних розмірностей Реньї

I.M. Zhuravel
Karpenko Phisico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, c. Lviv
Ukraine, 79060, c. Lviv, Naukova st., 3

Analysis of Texture Fractographic Images Based on the Spectrum of Fractal Dimensions Rainier

И.М. Журавель
Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины, г. Львов
Украина, 79060, г. Львов, ул. Научная, 3

Анализ текстуры фрактографических изображений на основе спектра фрактальных изображений Реньи

У статті досліджено застосування спектра фрактальних розмірностей Реньї для аналізу текстури фрактографічних зображень. Запропоновано використовувати цей підхід для класифікації типів зламів.
Ключові слова: фрактографічне зображення, фрактальна розмірність, спектр Реньї.

Investigated the use of the spectrum of fractal dimensions Renyi for texture analysis fraktohraphic images. Proposed to use this approach for the classification of types of fractures.
Key words: fracture image, fractal dimension, spectrum function Renyi.

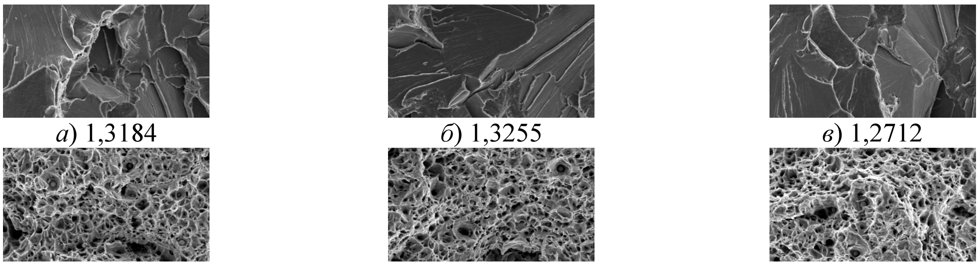
В статье исследовано применение спектра фрактальных размерностей Реньи для анализа текстуры фрактографических изображений. Предложено использовать этот подход для классификации типов изломов.
Ключевые слова: фрактографическое изображение, фрактальная размерность, спектр Реньи.

Сталь є одним із основних матеріалів, який широко використовується в будівництві мостів, трубо- та газопроводів, машинобудуванні та ін. З часом під впливом зовнішніх факторів метал втрачає свої механічні властивості, деградує та руйнується. Серед основних типів руйнування виділимо в'язке або пластичне та крихке, які залежать від умов, в яких відбувається експлуатація. Для прикладу, сталь при звичайній температурі та правильній формі деталей (стрижень) і в простих випадках дії сил (розтяг, стиск, кручення чи згин) має меншу протидію зсуву, ніж відриву, тому руйнується пластично. Але при низьких температурах, при попередньому розтягу чи неправильній формі деталей, які утруднюють деформацію зсуву, опір зсуву (пластичним деформаціям) може виявитися завищеним і перевищити опір відриву, внаслідок чого відбувається крихке руйнування.

Таким чином, знаючи тип руйнування металу, можна визначити зовнішні чинники, які до цього призвели. Тому актуальним є питання автоматичного визначення типу руйнування.

Для опису текстур зображень здебільшого використовують два підходи – статистичний та текстурний [1]. Основна складність при вивченні властивостей текстур полягає в тому, що важко розробити універсальний спосіб їх розпізнавання. Іншими словами, практично під будь-який тип текстури можна підібрати метод розпізнавання, який при відповідному налаштуванні буде давати стовідсотковий результат, але на іншому типі текстури він може не працювати зовсім. Одна з причин полягає в тому, що для опису складної текстури використовується евклідова геометрія. Евклідові розмірності можуть характеризувати симетричні текстури, які не надто часто зустрічаються у фрактографічних зображеннях. Тому для опису таких об’єктів доцільно використовувати фрактальну геометрію, яка характеризується спектром фрактальних розмірностей для кожного елементу текстури металу та чутлива до зміни конфігурації текстури.

У роботі [2] на прикладі сталі 15Х1МФ показано, що фрактографічні зображення різних типів зламів характеризуються різними значеннями фрактальних розмірностей. Для кількісної оцінки фрактальних розмірностей використано клітинний та крапковий метод. На рис. 1 представлені приклади фрактографічних зображень крихкого та в’язкого зламів.



а) 1,3184 *б*) 1,3255 *в*) 1,2712

г) 1,5892 *д*) 1,6588 *е*) 1,5739

Рисунок 1 – Фрактографічні зображення крихкого (*а*, *б*, *в*) та в’язкого руйнувань (*г*, *д*, *е*) сталі 15Х1МФ та відповідні їм значення фрактальних розмірностей

З рис. 1 видно, що фрактальна розмірність представляє собою одне число, яке не зажди в повній мірі може оцінити зображення складної текстури. У роботі [3] для оцінки складних текстур використовується мультифрактальний підхід. Вихідні дані для мультифрактального аналізу отримуються зі спектра розмірностей Реньї, складові якого мають визначений фізичний зміст. Наприклад, D_0 – просторова розмірність фракталу, D_1 – інформаційна розмірність і т.д. Але аналіз лише кількох цих величин без використання всього спектра розмірностей є недостатнім для повної характеристики структури матеріалу.

Мультифрактальний спектр представляє собою набір фрактальних розмірностей D_q, який, у свою чергу, може бути представлений деякою нелінійною функцією $\tau(q)$. Величини D_q не є фрактальними розмірностями у звичному розумінні, тому разом з ними використовується так звана функція мультифрактального спектра $f(\alpha)$. Її отримують шляхом перетворення Лежандра функції $\tau(q)$ [3]:

$$f(\alpha(q)) = \alpha(q) \cdot q - \tau(q). \quad (1)$$

Обчислення фрактальної розмірності за більшістю відомих методів полягає у визначенні та обчисленні деякої міри за зображенням. У даній роботі застосуємо підхід, який дещо подібний до клітинного методу обчислення фрактальної розмірності зображення. Нагадаємо, що мова йде про бінарне фактографічне зображення.

Представимо зображення у вигляді поверхні, яка покривається клітинами з розміром r_k, де $k = 1...K$. Кожна комірка оцінюється величиною

$$\mu_{(i,j),k} = \frac{n_{(i,j),k}}{N}, \tag{2}$$

де $n_{(i,j),k}$ – кількість пікселів зображення фракталу, які попали в квадратну комірку з розміром сторони r_k та центром в (i, j); N – загальна кількість пікселів у клітині.

Позначимо через N_k кількість комірок з розміром r_k, які потрібні, щоб покрити досліджувану фрактальну фігуру. Тоді у виразі (1) $f(\alpha(q))$ та $\alpha(q)$ обчислюємо наступним чином:

$$\alpha(q) \approx \frac{A_k(q)}{\ln(r_k)}, \text{ де } A_k(q) = \frac{\sum_{(i,j)}^{N_k}\left(\left(\mu_{(i,j),k}\right)^q \cdot \ln\left(\mu_{(i,j),k}\right)\right)}{\sum_{(i,j)}^{N_k}\left(\mu_{(i,j),k}\right)^q}, \tag{3}$$

$$f(\alpha(q)) \approx \frac{F_k(q)}{\ln(r_k)}, \text{ де } F_k(q) = \frac{\sum_{(i,j)}^{N_k}\left(\left(\mu_{(i,j),k}\right)^q \cdot \ln\left(\frac{\left(\mu_{(i,j),k}\right)^q}{\sum_{(i,j)}^{N_k}\left(\mu_{(i,j),k}\right)^q}\right)\right)}{\sum_{(i,j)}^{N_k}\left(\mu_{(i,j),k}\right)^q}. \tag{4}$$

Алгоритм обчислення мультифрактальних розмірностей згідно з виразами (3) та (4) є наступним. Бінарне зображення покривають комірками, розмір сторін яких r_k при кожному покритті буде різним. При кожному покритті обчислюємо величини $A_k(q)$ та $F_k(q)$. Таким чином, отримаємо K значень $A_k(q)$ та $F_k(q)$, які в системах координат $(A_k(q), \ln(r_k))$ та $(F_k(q), \ln(r_k))$ представляються наборами із K точок. Методом найменших квадратів розраховуємо величини $\alpha(q)$ та $f(\alpha(q))$. Надалі, згідно з виразом (1) обчислюємо величину $\tau(q)$. Після цього розраховуємо значення спектра узагальнених фрактальних розмірностей Реньї

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1}. \tag{5}$$

Для випадку, коли $q = 1$, тоді $D_1 = f(\alpha(1)) = \alpha(1)$. Використаємо отриманий вираз обчислення спектра Реньї для аналізу зображень. Зокрема, застосуємо описаний підхід для аналізу текстури фрактографічних зображень, які представлені на рис. 1. Для цього обчислимо спектр Реньї для кожного із представлених зображень. Надалі ці спектри попарно порівнюємо між собою, щоб виявити ознаки, які використаємо для класифікації зображень за типом злому. Подібність або відмінність між об’єктами класифікації встановлюється в залежності від обраної метричної відстані між ними. В нашому випадку об’єктом класифікації є зображення і воно описується спектром Реньї D_q, який представляє собою вектор параметрів D_i. Зображення може бути представлене як деяка точка в i-вимірному просторі. Таким чином, схожість між зображеннями буде визначатися як відповідна відстань між цими точками. При класифікації використовують різноманітні міри відстаней між об’єктами – це різні типи евклідових відстаней, відстань за Хемінгом, процент невідповідності тощо. В даній

роботі за міру відстаней між двома спектрами використаємо відстань Чебишева, яка приймає значення найбільшого модуля різниці між значеннями відповідних властивостей об’єктів. Стосовно нашого випадку цей вираз матиме наступний вигляд:

$$d = \max_{q} \left| D_q - D_q' \right|. \tag{6}$$

Важливим питанням при побудові спектра Реньї є вибір діапазону зміни степеня q. В багатьох роботах [3], [4] за ознаки зображення використовують лише значення спектрів D_q при $q \geq 0$. В даній роботі обчислимо значення спектра Реньї як для $q < 0$, так і для $q \geq 0$. Це розширить діапазон ознак, які використовуються для опису досліджуваного зображення, а отже, і підвищить точність аналізу.

Згідно з викладеним вище, обчислимо спектр Реньї для кожного зображення на рис. 1. Після цього для кожної пари зображень знайдемо відстань між їх спектрами за допомогою виразу (6). Результати проведених досліджень наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати обчислення відстаней Чебишева для спектрів Реньї пар зображень, які представлені на рис. 1

Зображення	*а*)	*б*)	*в*)	*г*)	*д*)	*е*)
а)	0	0,0665	0,0319	1,0042	0,9671	0,9502
б)		0	0,0955	0,9971	0,9600	0,9431
в)			0	1,0180	0,9809	0,9639
г)				0	0,0676	0,0540
д)					0	0,0682
е)						0

В табл. 1 наведені результати обчислення відстаней Чебишева для спектрів Реньї всіх можливих пар зображень, які представлені на рис. 1. З табл. 1 чітко видно, що отримані результати обчислення за значеннями можна розділити на три частини. Перша частина – це відстані за Чебишевим для групи зображень *а*), *б*) і *в*), які представляють собою фрактографічні зображення крихкого злому. Значення цих відстаней знаходяться в діапазоні від 0,0319 до 0,0955. Другу частину становлять результати обчислення відстаней за Чебишевим для пар фрактографічних зображень крихкого злому *а*), *б*), *в*) та в’язкого злому *г*), *д*) і *е*). Ці результати знаходяться в діапазоні від 0,9431 до 1,0180. Третя частина – це відстані за Чебишевим для групи зображень *г*), *д*) і *е*), які представляють собою фрактографічні зображення в’язкого злому. Значення цих відстаней знаходяться в діапазоні від 0,0540 до 0,0682. Таким чином, відстань за Чебишевим для пари фрактографічних зображень, які представляють один тип руйнування, є невеликою – максимум 0,0955. Для пари фрактографічних зображень з різними типами руйнування відстань за Чебишевим є на порядок вищою і становить мінімально 0,9431. Отже, якщо у досліджуваній парі використати еталонне фрактографічне зображення з відомим типом руйнування, то в автоматичному режимі, в залежності від значення відстані за Чебишевим, можна встановлювати тип руйнування другого фрактографічного зображення. Цей тип злому буде співпадати з типом злому на еталонному зображенні, якщо відстань за Чебишевим буде меншою за 0,09, та відмінним від еталонного, якщо цей параметр буде більшим за 0,9431.

У даній роботі запропоновано підхід до класифікації фрактографічних зображень зламів через використання спектра узагальнених фрактальних розмірностей Реньї.

Встановлено, що використання запропонованого підходу дає можливість класифікувати досліджувані зображення за мінімальною відстанню Чебишева. При аналізі фрактографічних зображень слід враховувати, що спектр узагальнених фрактальних розмірностей Реньї є чутливим до масштабу, інтенсивності та повороту. Цей аспект також може використовуватися при оцінці текстурованих зображень.

Література

1. Харалик Р.М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур / Р.М. Харалик // ТИИЭР. – 1979. – Т. 67, № 5.
2. Журавель І.М. Автоматичне розпізнавання крихкого та в'язкого зламів сталі 15Х1МФ з використанням фрактальної розмірності / І.М. Журавель // Обчислювальні методи і системи перетворення інформації : науково-технічна конференція, (7 – 8 жовтня 2010 р.). – Львів. – С. 176-178.
3. Рогов А.А. Применение спектра фрактальных размерностей Реньи как инварианта графического изображения / А.А. Рогов, К.Н. Спиридонов // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2008. – Сер. 10, Вып. 2. – С. 30-43.
4. Встовский Г.В. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов / Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. – Ижевск : Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 116 с.

Literatura

1. Kharalyk R.M. Statystycheskyy y strukturnyi podkhody k opysanyyu tekstur // TYYER. – 1979. – T. 67, № 5.
2. Zhuravel' I.M. Avtomatychne rozpiznavannya krykhkoho ta v'yazkoho zlamiv stali 15Kh1MF z vykorystannyam fraktal'noyi rozmirnosti // Naukovo-tekhnichna konferentsiya «Obchysolyuval'ni metody i systemy peretvorennya informatsiyi», 7 – 8 zhovtnya 2010 r. – L'viv. – S. 176-178.
3. Rohov A.A. Prymenenye spektra fraktal'nykh razmernostey Ren'y kak ynvaryanta hrafycheskoho yzobrazhenyya / A.A. Rohov, K.N.Spyrydonov // Vestnyk Sankt-Peterburhskoho unyversyteta. – 2008. – Ser. 10, V. 2. – S. 30-43.
4. Vstovskyy H.V. Vvedenye v mul'tyfraktal'nuyu parametryzatsyyu struktur materyalov / Vstovskyy H.V., Kolmakov A.H., Bunyn Y.Zh.– Yzhevsk : Nauchno-yzdatel'skyy tsentr «Rehulyarnaya y khaotycheskaya dynamyka», 2001. – 116 s.

RESUME

I.M. Zhuravel

Analysis of Texture Fractographic Images Based on the Spectrum of Fractal Dimensions Rainier

Quantitative analysis fractographic images is one of the urgent problems in materials science. It gives opportunity to evaluate the mechanical properties of the material, its degradation, to determine the types of breaks and more. It is important to choose the correct tools for quantitative analysis. Euclidean geometry is not always easy and allows fully appreciate the complex texture fraktohrafichnyh images. In this work, the use of generalized spectrum of fractal dimensions Renyi to classify types of fractures by fractographic images. Determined that the proposed approach makes it possible to classify the studied images Chebyshev minimum distance.

Стаття надійшла до редакції 08.01.2013.